

明細書

スポット溶接部の破断予測装置、方法、コンピュータプログラム、及びコンピュータ読み取り可能な記録媒体

技術分野

[0001] 本発明は、自動車用の構造部材のスポット溶接を利用して好適な、より詳しくは衝突変形時に部材のスポット溶接部が破断するのを予測するためのスポット溶接部の破断予測装置、方法、コンピュータプログラム、及びコンピュータ読み取り可能な記録媒体に関する。

背景技術

[0002] 近年、自動車業界では、衝突時の乗員への傷害を低減しうる車体構造の開発が急務の課題となっている。そのような衝突安全性に優れた車体構造は、衝突時の衝撃エネルギーを客室部以外の構造部材で吸収させ、客室部の変形を最小限とし生存空間を確保することにより実現できる。つまり、構造部材により衝撃エネルギーを吸収させることが重要である。

[0003] 自動車のフルラップ衝突やオフセット衝突での衝撃エネルギーを吸収させる主要な構造部材はフロントサイドメンバーである。フロントサイドメンバーは、プレス成形等で部材成形後、スポット溶接により部材を閉断面化している。通常このフロントサイドメンバーを座屈させることで、衝撃エネルギーを吸収させる。衝撃エネルギーの吸収を向上させるためには、座屈形態を安定化させ、途中で折れ曲りや破断をさせないことが重要である。

[0004] 前記の部材のスポット溶接に関して、座屈を安定化させるためにはスポット溶接間隔やナゲット径や溶接条件を最適化しないと、座屈時に溶接点からの破断が起きてしまい、安定した座屈形態にならず衝撃エネルギーの吸収が低下するという問題がある。

[0005] 非特許文献1:解説論文No. 9705JSAESYMPOSIUM「新しい車体構造成形技術」

非特許文献2:JIS Z3136

非特許文献3:JIS Z3137

特許文献1:特開平6-182561号公報

特許文献2:特開2002-31627号公報

発明の開示

- [0006] 従来からこの問題の解決のため、例えば非特許文献1にあるように、スポット溶接間隔をいろいろと変えて部材を試作し、座屈試験をして溶接点で破断せず安定に座屈する条件を調べていた。しかしながら、この方法では自動車ごと、また部材ごとに試作をつくり試験を行うという試行錯誤が必要となり、製作コストがかかり、設計にも時間を要するという問題を抱えていた。
- [0007] また、特許文献1には、フロアパネルでの荷重のかかるところの溶接部の剥離防止構造が提案されているがフロアパネルについてのみの構造であり、すべての衝撃吸収部材で溶接点の剥離を防ぎ安定座屈により衝撃エネルギーを吸収するスポット溶接法には試作による試行錯誤になっていた。
- [0008] さらに、特許文献2では、スポット溶接間隔の最適化が提案されているが、個々のスポット溶接強度については、単純な指標でしかも、破断そのものの正確な予測になつていないので、精度の良いスポット溶接部破断の予測にもとづく設計ができる問題があった。
- [0009] スポット溶接部の強度の指標は、非特許文献2、3に規定される、せん断引張試験及び十字形引張試験が代表的である。この他にも多様な荷重状態を想定した多様な試験形態での報告例はあるが、一般には、JISで規定された2種の試験により、せん断引張試験値を溶接部のせん断強度として、また、十字形引張試験値を溶接部の剥離強度として扱っている。
- [0010]しかし、試験により得られたスポット溶接のせん断強度及び剥離強度が、幅等の構造影響を受けることから、実部材では、試験値を様々な観点から補正して推定せざるを得ない。近年飛躍的に進歩してきた計算機上で自動車の衝突のシミュレーションによる最適設計を行うシステムにおいては、この推定精度が十分とは言えず、衝突安全の最適な設計の信頼性を低下させていた。
- [0011]本発明は、部材の試作・衝突試験によらず、コンピュータ上での有限要素法解析により、衝撃変形時におけるスポット溶接部の破断の予測を有限要素法解析中に組込

んだ予測モデルにより判定して、部材の衝撃時の溶接部破断を防ぎ、変形座屈モードの適正化を図り、衝撃エネルギーの吸収を向上させることを目的とするものである。

[0012] 本発明の要旨は以下の通りである。

(1)スポット溶接継ぎ手において、十字型引張試験及び／又はせん断型引張試験を基に、材料強度、板厚、スポット溶接のナゲット径、継ぎ手の板幅、及び引張試験の継ぎ手の回転角のすべて或いはいずれかを入力する入力手段と、

前記材料強度、板厚、スポット溶接のナゲット径、継ぎ手の板幅、及び引張試験の継ぎ手の回転角のすべて或いはいずれかから、十字型引張及び／又はせん断型引張でのスポット溶接部の破断強度パラメータを算出する演算手段と、

前記鋼種毎の破断強度パラメータを記憶するパラメータ記憶手段と、

前記パラメータ記憶手段に記憶した破断強度パラメータを、有限要素法によりスポット溶接周りの変形をモデル化した破断予測式に導入して、スポット溶接部破断を判定する演算手段とを有することを特徴とするスポット溶接部の破断予測装置。

(2)スポット溶接継ぎ手において、十字型引張試験及び／又はせん断型引張試験を基に、材料強度、板厚、スポット溶接のナゲット径、継ぎ手の板幅、及び引張試験の継ぎ手の回転角を入力する入力手段と、

前記材料強度、板厚、スポット溶接のナゲット径、継ぎ手の板幅、及び引張試験の継ぎ手の回転角のすべて或いはいずれかから、スポット溶接部の破断強度曲線を求め、前記破断強度曲線に基づき十字型引張及び／又はせん断型引張での破断強度パラメータを算出する演算手段と、

前記鋼種毎の破断強度パラメータを記憶するパラメータ記憶手段と、

前記パラメータ記憶手段に記憶した破断強度パラメータを、有限要素法によりスポット溶接周りの変形をモデル化した破断限界線に導入して、スポット溶接部破断を判定する演算手段とを有することを特徴とするスポット溶接部の破断予測装置。

(3)スポット溶接継ぎ手において、十字型引張試験及び／又はせん断型引張試験を基に、材料強度、板厚、スポット溶接のナゲット径、継ぎ手の板幅、及び引張試験の継ぎ手の回転角のすべて或いはいずれかを入力する工程と、

前記材料強度、板厚、スポット溶接のナゲット径、継ぎ手の板幅、及び引張試験の

継ぎ手の回転角のすべて或いはいずれかから、十字型引張及び／又はせん断型引張でのスポット溶接部の破断強度パラメータを算出する工程と、

前記鋼種毎の破断強度パラメータをパラメータ記憶手段に記憶する工程と、

前記パラメータ記憶手段に記憶した破断強度パラメータを、有限要素法によりスポット溶接周りの変形をモデル化した破断予測式に導入して、スポット溶接部破断を判定する工程とを有することを特徴とするスポット溶接部の破断予測方法。

(4) スpot溶接継ぎ手において、十字型引張試験及び／又はせん断型引張試験を基に、材料強度、板厚、スポット溶接のナゲット径、継ぎ手の板幅、及び引張試験の継ぎ手の回転角のすべて或いはいずれかを入力する工程と、

前記材料強度、板厚、スポット溶接のナゲット径、継ぎ手の板幅、及び引張試験の継ぎ手の回転角のすべて或いはいずれかから、スポット溶接部の破断強度曲線を求め、前記破断強度曲線に基づき十字型引張及び／又はせん断型引張での破断強度パラメータを算出する工程と、

前記鋼種毎の破断強度パラメータをパラメータ記憶手段に記憶する工程と、

前記パラメータ記憶手段に記憶した破断強度パラメータを、有限要素法によりスポット溶接周りの変形をモデル化した破断限界線に導入して、スポット溶接部破断を判定する工程とを有することを特徴とするスポット溶接部の破断予測方法。

(5) スpot溶接継ぎ手において、十字型引張試験及び／又はせん断型引張試験を基にして入力される材料強度、板厚、スポット溶接のナゲット径、継ぎ手の板幅、及び引張試験の継ぎ手の回転角のすべて或いはいずれかから、十字型引張及び／又はせん断型引張でのスポット溶接部の破断強度パラメータを算出する工程と、

前記鋼種毎の破断強度パラメータをパラメータ記憶手段に記憶する工程と、

前記パラメータ記憶手段に記憶した破断強度パラメータを、有限要素法によりスポット溶接周りの変形をモデル化した破断予測式を導入して、スポット溶接部破断を判定する工程とをコンピュータに実行させることを特徴とするスポット溶接部の破断予測のためのコンピュータプログラム。

(6) スpot溶接継ぎ手において、十字型引張試験及び／又はせん断型引張試験を基にして入力される材料強度、板厚、スポット溶接のナゲット径、継ぎ手の板幅、及び

引張試験の継ぎ手の回転角のすべて或いはいずれかから、スポット溶接部の破断強度曲線を求め、前記破断強度曲線に基づき十字型引張及び／又はせん断型引張でのスポット溶接部の破断強度パラメータを算出する工程と、

前記鋼種毎の破断強度パラメータをパラメータ記憶手段に記憶する工程と、

前記パラメータ記憶手段に記憶した破断強度パラメータを、有限要素法によりスポット溶接周りの変形をモデル化した破断限界線に導入して、スポット溶接部破断を判定する工程とをコンピュータに実行させることを特徴とするスポット溶接部の破断予測のためのコンピュータプログラム。

(7) スpot溶接継ぎ手において、十字型引張試験及び／又はせん断型引張試験を基にして入力される材料強度、板厚、スポット溶接のナゲット径、継ぎ手の板幅、及び引張試験の継ぎ手の回転角のすべて或いはいずれかから、十字型引張及び／又はせん断型引張でのスポット溶接部の破断強度パラメータを算出する工程と、

前記鋼種毎の破断強度パラメータをパラメータ記憶手段に記憶する工程と、

前記パラメータ記憶手段に記憶した破断強度パラメータを、有限要素法によりスポット溶接周りの変形をモデル化した破断予測式を導入して、スポット溶接部破断を判定する工程とをコンピュータに実行させるコンピュータプログラムを記録したことを特徴とするコンピュータ読み取り可能な記録媒体。

(8) スpot溶接継ぎ手において、十字型引張試験及び／又はせん断型引張試験を基にして入力される材料強度、板厚、スポット溶接のナゲット径、継ぎ手の板幅、及び引張試験の継ぎ手の回転角のすべて或いはいずれかから、スポット溶接部の破断強度曲線を求め、前記破断強度曲線に基づき十字型引張及び／又はせん断型引張でのスポット溶接部の破断強度パラメータを算出する工程と、

前記鋼種毎の破断強度パラメータをパラメータ記憶手段に記憶する工程と、

前記パラメータ記憶手段に記憶した破断強度パラメータを、有限要素法によりスポット溶接周りの変形をモデル化した破断限界線に導入して、スポット溶接部破断を判定する工程とをコンピュータに実行させるコンピュータプログラムを記録したことを特徴とするコンピュータ読み取り可能な記録媒体。

図面の簡単な説明

[0013] [図1]図1はせん断型引張試験方法の概要を示す図である。

[図2]図2は十字型引張試験方法の概要を示す図である。

[図3]図3は十字型引張試験の試験時の側面図である。

[図4]図4は破断強度曲線の一例を示す図である。

[図5]図5は破断限界線と計算の強度Fn, Fsの関係を示す図である。

[図6]図6はせん断型試験の破断時の荷重と変位の関係を実験とシミュレーション(FEM)で比較した図である。

[図7]図7は十字型試験の破断時の荷重と変位の関係を実験とシミュレーション(FEM)で比較した図である。

[図8]図8はスポット溶接部の破断予測装置を構成可能なコンピュータシステムの一例を示すブロック図である。

[図9]図9は実際の590MPa級、厚さ1.8mmの破断強度曲線を示す図である。

[図10]図10は実験から求めた α とd/Wの曲線関係を示す図である。

[図11]図11は980MPa級の高強度鋼でのせん断型試験の破断時の荷重と変位の関係を実験とシミュレーション(FEM)で比較した図である。

[図12A]図12Aは動的圧潰試験に使用した980MPa級の高強度鋼での部材形状を示す図である。

[図12B]図12Bは動的圧潰試験時のスポット溶接部の破断の様子をシミュレーション(FEM)した結果を示す図である。

[図12C]図12Cは動的圧潰試験時のスポット溶接部の破断の様子を示す写真である。

発明を実施するための最良の形態

[0014] 以下、図面を参照して、本発明の好適な実施形態について説明する。図1は、せん断型引張試験の概要を示す図である。試験片は、図のように母材2である2枚の鋼板を重ねてスポット溶接し、ナゲット1を形成する。この試験片を矢印3で示す方向に試験片が破断するまで引張試験を行う。このとき、引張方向3における試験片の変位と荷重を測定する。ナゲット1の周りで破断が発生し、このときに、最大荷重となり、これを破断限界荷重Ftss(N)とする。この限界荷重Ftssとなったとき、母材2の幅W(mm)

)、板厚t(mm)から、母材内の平均応力 σ_o (MPa)は、 $F_{tss}/W \cdot t$ である。

- [0015] 破断の起点となるナゲット1の周りにおいては、最大応力が引張強さTS(MPa)に達したと仮定すれば、ナゲット1の端部と母材2における応力集中係数 α を、母材の引張強さTSと母材の平均引張応力 σ_o の比として(1)式のように定義できる。

$$\alpha = TS / \sigma_o = TS \cdot W \cdot t / F_{tss} \cdots (1)$$

- [0016] 様々な引張り強さTSの材料で、様々な試験片幅W、板厚t、ナゲットの直径d(mm)で、破断限界荷重Ftssを測定することで、この応力集中係数 α を、(1)式から算出してデータベースとして表を作成しておく。これから、任意の引張り強さTS、板厚t、幅W、ナゲット径dでの破断限界荷重Ftssは、表の応力集中係数 α を用いて、(2)式で予測できる。

$$F_{tss} = TS \cdot W \cdot t / \alpha \cdots (2)$$

- [0017] また、応力集中係数 α は、ナゲット径dと幅Wの比 d/W で整理すると一つの曲線になることから、(3)式から算出した α を用いて、(2)式からもFtssを予測しても良い。

$$\alpha = k / (p \cdot d / W - q)^n + r \cdots (3)$$

ここで、k、p、q、n、及びrは、 α と d/W の曲線の関係を(3)式でフィッティングするためのパラメータであり、 $k=0.001 \sim 100$ 、 $p=0.01 \sim 100$ 、 $q=-10 \sim 10$ 、 $n=1 \sim 10$ 、 $r=-100 \sim 100$ とすることが好ましい。但し、曲線をフィッティングする式は、必ずしも(3)式の形でなくとも良く、曲線関係をフィッティングできる式であれば良い。また、(3)式を用いなくとも、曲線のグラフから直接 α を読み取っても良い。

- [0018] 次に、スポット溶接で結合した任意の形状の部材を、コンピュータ上で有限要素法を用いてモデル化する。スポット溶接をモデル化した、部材同士をつなぐ要素の、部材面に沿う方向のせん断力 $F_s(N)$ と、それに直交する部材同士をつなぐ方向の垂直力 $F_n(N)$ を有限要素法で再現した衝突解析の変形中に逐次、コンピュータに算出させる。この F_s 及び F_n の算出手段は、汎用の解析コードに依存するが、例えば、ESI社製PAM-CRASH v2002 user's manualを参照する。コンピュータ上で破断判定は、(4)式が成立したときとする。

$$F_n^2 + F_s^2 \geq F_{tss}^2 \cdots (4)$$

- [0019] 図2は、十字型引張試験方法の概要を示す図である。試験片は、図のように母材2

である2枚の鋼板を重ねてスポット溶接し、ナゲット1を形成する。この試験片を矢印3で示す方向に試験片が破断するまで引張試験を行う。このとき、引張方向3の試験片の変位と荷重を測定する。ナゲット1の周りで破断が発生し、このときに、最大荷重となり、これを破断限界荷重Fcts(N)とする。この限界荷重Fctsとなったとき、母材2の幅W(mm)、板厚t(mm)から、母材の板面内の平均応力 σ_o は、図3に示す角度 θ を用いて、 $Fcts/(2W \cdot t \cdot \sin \theta)$ である。

- [0020] 破断の起点となるナゲット1の周りにおいては、最大応力が引張強さTS(MPa)に達したと仮定すれば、ナゲット1の端部と母材2における応力集中係数 α を、母材の引張強さTS(MPa)と母材の平均引張応力 σ_o (MPa)の比として(5)式のように定義できる。

$$\alpha = TS / \sigma_o = TS \cdot W \cdot t / Fcts \cdots (5)$$

- [0021] これは、せん断型引張試験で求めた(1)式と全く同形式であり、引張方向が違うため、角度補正 θ が入る。従って、せん断型引張りと同じ方法で、任意の材料、幅、板厚、ナゲット径で、破断限界荷重Fctsは、(6)式から算出できる。

$$Fcts = 2 \cdot TS \cdot W \cdot t \cdot \sin \theta / \alpha \cdots (6)$$

- [0022] せん断型引張りの場合と同じように、任意の部材において、衝突変形時のスポット溶接部の破断判定をコンピュータ上で、(7)式が成立したときとする。

$$Fn \geq Fcts \cdots (7)$$

- [0023] 以上から、(1)式、(2)式、(3)式、(5)式及び(6)式で、破断限界荷重(破断強度パラメータ)Ftss及びFctsを算出し、任意の部材で有限要素法により衝突の変形を解析し、スポット溶接の破断判定を(4)式又は(7)式のどちらかが先に成立するか、同時に成立したときとする。

- [0024] 部材の形状及び荷重入力の方法から、変形の形式が分っている場合は、(4)式又は(7)式の片方のみをコンピュータ上で計算して判定しても良い。また、コンピュータ上で、Fn及びFsの比を逐次計算し、例えば、 $Fn > 3Fs$ であれば(7)式を用い、それ以外では(4)式を用いて破断判定をしても良い。

- [0025] このようにすることにより、スポット溶接の破断判定を、実際に部材を作成して衝突試験により検証することなく、コンピュータ上で正確に予測することができる。この方法

を用いることで、コンピュータ上で、部材形状や、材料、板厚、ナゲット径、溶接位置を変えることでスポット溶接が破断しない条件を調べることができ、最適な部材を設計することができる。

- [0026] 上記の方法と異なり、特に材料の引張強さTSが590(MPa)より大きい場合のスポット溶接の破断限界荷重は、せん断型引張試験のFtssでは、(2)式、(3)式の代りに下記(2')式、(3m)式を、十字型引張試験のFctsでは、(3)式、(6)式の代わりに下記(3m2)式、(3m3)式、(3m4)式、(6')式を用いて算出するのが好適である。

$$Ftss = TS \cdot W \cdot t / \alpha_1 \cdots (2')$$

$$\alpha_1 = (e(TS/f - g)^b - i) / (d/W)^j + 1 \cdots (3m)$$

ここで、e, f, g, h, i, 及びjは、 α_1 とd/Wの曲線の関係を(3m)式でフィッティングするためのパラメータであり、e=0.0001~100, f=100~2500(MPa), g=0.1~10, h=0.0001~10, i=0.01~100, j=1~100である。

$$Fcts = 2 \cdot TS \cdot W \cdot t \cdot \sin \theta / \alpha_2 \cdots (6')$$

$$\alpha_2 = \beta / (d/W) \chi + \delta \cdots (3m2)$$

$$\chi = \phi (TS/\gamma - \eta) \Psi - \xi \cdots (3m3)$$

$$\delta = \lambda (TS/\mu - \rho) \omega - \zeta \cdots (3m4)$$

ここで、 β , χ , δ , ϕ , γ , η , Ψ , ξ , λ , μ , ρ , ω , 及び ζ は、 α_2 とd/Wの曲線の関係を(3m2)式、(3m3)式、及び(3m4)式でフィッティングするためのパラメータであり、 $\beta=0.0001~100$, $\phi=0.1~100$, $\gamma=100~2500(MPa)$, $\eta=0.1~10$, $\Psi=0.0001~100$, $\xi=0.01~100$, $\lambda=0.01~100$, $\mu=100~2500(MPa)$, $\rho=0.1~10$, $\omega=0.0001~100$, $\zeta=0.01~100$ である。

- [0027] 曲線をフィッティングする式は、必ずしもこれらの式の形でなくても良く、曲線関係をフィッティングできる式であれば良い。また、これらの式を用いなくても、 α_1 又は α_2 とd/Wの曲線の関係は強度クラス毎に一つの曲線となることから、それぞれの曲線のグラフから直接 α_1 又は α_2 を読み取っても良い。

- [0028] 図4は、(1)式、(2)式、(3)式、及び、(5)式、(6)式、又は(3)式の代わりに(3m)式、(3m2)式、(3m3)式、(3m4)式のように、数式を用いて破断限界荷重を算出す

る以外に、実験データに基づくグラフから算出する方法を模式的に表したものであり、 d/W を変えた試験で破断限界荷重を実測し、グラフ化すると、材料強度TSによって、様々な線で、破断荷重曲線を書くことができる。ここで、材料強度は $TS_1 < TS_2 < TS_3$ である。この曲線から直接、条件に合う破断限界荷重を同定することができる。この曲線は、板厚tを第3軸に探ることで、破断限界荷重曲面となり、任意の板厚t、材料強度TS、幅W、ナゲット径dで、曲面上の値を読み取ることで破断限界荷重を同定できる。

- [0029] さらに、(4)式及び(7)式を用いる代わりに、様々な回転角 θ で同定した破断限界荷重で、図5に示すように、破断限界線を作成し、これと、有限要素法の解析で逐次計算される F_n, F_s とを比較して、曲線上及び曲線の外側にきたときに破断と判定しても良い。
- [0030] この方法は、鉄鋼材料だけでなく、あらゆる材料に適用することができる。また、スポット溶接だけなく、レーザー溶接、アーク溶接、シーム溶接、マッシュシーム溶接等のあらゆる溶接、さらにはTOX接合、リバット接合等のあらゆる機械接合、摩擦接合や拡散接合、摩擦拡散接合、接着剤による接合すべてに応用することができる。コンピュータ上の計算方法は、有限要素法に限らず、境界要素法、差分法、メッシュレス法や、初等解析やあらゆる計算方法に適用でき、材料力学やコンピュータによらない計算方法に適用しても良い。
- [0031] 実験による応力集中係数 α の算出方法も、上記のせん断型引張試験、十字型引張試験に限らず、あらゆる試験片形状、荷重負荷方法で、算出することができる。
- [0032] 上記の破断判定の予測は、自動車全体、部材の衝突解析だけでなく、自動車以外の部品にも適用でき、衝突以外の準静的な変形での解析にも適用できることは言うまでもない。
- [0033] 図8は、スポット溶接部の破断予測装置を構成可能なコンピュータシステムの一例を示すブロック図である。同図において、1200はコンピュータPCである。PC1200には、CPU1201を備え、ROM1202又はハードディスク(HD)1211に記憶された、あるいはフレキシブルディスクドライブ(FD)1212より供給されるデバイス制御ソフトウェアを実行し、システムバス1204に接続される各デバイスを総括的に制御する。

- [0034] 前記PC1200のCPU1201、ROM1202又はハードディスク(HD)1211に記憶されたプログラムにより、本実施形態の各機能手段が構成される。
- [0035] 1203はRAMで、CPU1201の主メモリ、ワークエリア等として機能する。1205はキーボードコントローラ(KBC)であり、キーボード(KB)1209から入力される信号をシステム本体内に入力する制御を行う。1206は表示コントローラ(CRTC)であり、表示装置(CRT)1210上の表示制御を行う。1207はディスクコントローラ(DKC)で、ブートプログラム(起動プログラム:パソコンのハードやソフトの実行(動作)を開始するプログラム)、複数のアプリケーション、編集ファイル、ユーザファイルそしてネットワーク管理プログラム等を記憶するハードディスク(HD)1211、及びフレキシブルディスク(FD)1212とのアクセスを制御する。
- [0036] 1208はネットワークインターフェースカード(NIC)で、LAN1220を介して、ネットワークプリンタ、他のネットワーク機器、或いは他のPCと双方向のデータのやり取りを行う。
- [0037] 上述した実施形態の機能は、コンピュータがコンピュータプログラムを実行することによっても実現される。また、コンピュータプログラムをコンピュータに供給するための手段、例えはかかるプログラムを記録したCD-ROM等のコンピュータ読み取り可能な記録媒体又はかかるプログラムを伝送するインターネット等の伝送媒体も本発明の実施形態として適用することができる。また、前記のプログラムを記録したコンピュータ読み取り可能な記録媒体等のコンピュータプログラムプロダクトも本発明の実施形態として適用することができる。前記のコンピュータプログラム、記録媒体、伝送媒体及びコンピュータプログラムプロダクトは、本発明の範疇に含まれる。記録媒体としては、例えばフレキシブルディスク、ハードディスク、光ディスク、光磁気ディスク、CD-ROM、磁気テープ、不揮発性メモリ、ROM等を用いることができる。
- [0038] (実施例1)
- 上述した破断予測モデルを使い、汎用衝突解析FEMコードにサブルーチンプログラムとして、部材の衝突変形の解析中にスポット溶接部の破断を自動判定するシステムを構築した。使用したコードはESI社製PAM-CRASH v2002であり、シェル要素でモデル化した部材について、Multi-PLINKを用いてスポット溶接部をモデル化している

。

[0039] 破断予測モデルの精度検証には、せん断型引張試験、十字型引張試験そのものをモデル化した解析と実験の比較が、厳密な比較が可能となるので最も良い。そこで、590MPa級の厚さ $t=1.8\text{mm}$ の鋼板で、JIS規格 3136、3137に準じたせん断型引張試験片及び十字型引張試験片を作成した。スポット溶接のナゲット径は、 $5\sqrt{t}$ である。インストロンタイプ試験機を用いて試験を実施し、その際のスポット溶接部破断までの荷重と変位を計測した。同時に、試験と同一形状のせん断型引張試験と十字型引張試験をコンピュータ上でモデル化し、上記のサブルーチンプログラムを実装したFEMコードで引張試験の解析を行いスポット溶接部の破断を自動判定させて、実験と同様のスポット溶接の破断までの荷重と変位を計算した。入力した初期パラメータは、 $TS=642(\text{MPa})$ 、 $t=1.8(\text{mm})$ 、 $d=6.7(\text{mm})$ 、 $\theta=23^\circ$ を、共通のパラメータとし、せん断型引張試験では、

$$\alpha = 1.80(-)、W = 40(\text{mm})$$

を用い、十字型引張試験では、

$$\alpha = 2.17(-)、W = 50(\text{mm})$$

を用いた。これより得られた破断強度パラメータ $F_{tsS}=25680(\text{N})$ 、 $F_{cts}=20798(\text{N})$ を有限要素法によりスポット溶接周りの変形をモデル化した破断予測式に導入して、スポット溶接部破断を判定した。

[0040] 試験モデルは、実際の部材の衝突解析で適用できることを考慮して、実車の衝突解析レベルの粗いシェル要素で作成し、境界条件も単純化している。

[0041] 図6及び図7は、このシステムの検証例であり、4はせん断型引張試験片のシミュレーション、5は十字型引張試験のシミュレーションを示す。せん断型引張試験、十字型引張試験のそれぞれで、破断モードが異なるが、実験とFEM解析の荷重-ストローク曲線上で破断荷重が一致していることが分る。せん断型引張試験では、破断荷重に至るまでの荷重-変位曲線の形状が実験と解析で異なるように見える。これは実験では試験片チャックがユニバーサルジョイントを介してクロスヘッドにつながっているため、荷重立上がり時にチャック部の回転が起きており、解析ではこの回転をモデルの単純化で考慮していないために異なるように見えるだけである。これは初期の

ストローク変化の挙動を変えるだけであるので、破断発生時の荷重には本質的に影響されない。十字型引張試験でも荷重-変位曲線の挙動が実験と解析で、やや異なるもの同様に実験のチャックの問題であり、初期の挙動への影響のみで、破断荷重では実験と解析は一致する。もちろんチャック部分も含めて解析上でモデル化すれば、この部分の挙動も実験と一致するが、ここでは本質的問題でないので省略する。むしろ、この試験を単純なモデル化をしたFEM解析でも、実際の試験の破断荷重を正確に予測できることにより、実車の全体モデルや部分モデルの大規模な衝突解析で、詳細部を単純化した実用レベルの解析でも、正確にスポット破断を予測できることを示している。

- [0042] このように、基本的な試験で精度よくスポット溶接の破断を予測できる解析方法であることを検証することができた。また、部品レベルでの衝突変形時のスポット溶接破断の予測について実験・解析両面から検証しており、解析での破断予測が実験と一致することを確かめている。以上から、スポット溶接部の破断の可否により、部材の変形モード、吸収エネルギーの制御・設計が可能なシステムであることが確かめられた。
- [0043] この方法は、汎用ソルバーPAM-CRASHだけでなく、LSTC社製LS-DYNA3Dや、MECALOG社製RADIOSS等の汎用ソルバーや、個別に開発されたソルバーにも導入することができる。また、スポット溶接部のモデルも、Multi-PLINKのような接触タイプだけでなく、ビーム要素や、シェル要素、ソリッド要素等にも適用可能である。
- [0044] (実施例2)

次に、破断強度曲線を用いて、せん断型引張強度の予測精度の検証を行った。材料は、実施例1と同じ590MPa級、厚さ=1.8mmの鋼板である。まず、せん断型引張試験の試験片の幅Wを20~50mmと変化させると同時に、ナゲット直径dも4~7mmと変化させて、試験を行い、破断強度パラメータ F_{tss} を実測する。この結果から、図9に示す破断強度曲線を得ることができる。実施例1と同じ、 $d=6.7\text{ mm}$ 、 $W=40\text{ mm}$ の条件では、この破断強度曲線から、図9の○印で示すように、破断強度パラメータ $F_{tss}=25.5\text{ (kN)}$ と読み取ることができる。これは、実施例1の同じ条件の F_{tss} とほぼ同じ値であり、以下、実施例1と同じく試験をモデル化した有限要素法(FEM)解析を行うことにより、図6に示すように、実験とFEM解析の荷重-ストローク曲線上

で破断荷重が一致していることが確認できる。従って、幅Wとナゲット直径dを実用に対応する広い範囲で変えて、破断強度曲線を作成しておけば、実用でのあらゆる条件での破断強度パラメータを得ることができることを示している。上記は、材料の強度と板厚が決まっている場合を示したが、強度と板厚が変わる場合も、それぞれについて破断強度曲線を作成すればよい。

[0045] (実施例3)

次に、特に引張強度が590MPa級より大きい場合の破断予測モデルを使い、汎用衝突解析FEMコードにサブルーチンプログラムとして、部材の衝突変形の解析中にスポット溶接部の破断を自動判定するシステムを構築した。使用したコードはESI社製PAM-CRASHv2003であり、シェル要素でモデル化した部材について、Multi-PLINKを用いてスポット溶接部をモデル化している。

[0046] 破断予測モデルの精度検証には、せん断型引張試験そのものをモデル化した解析と実験の比較が、厳密な比較が可能となるので最も良い。そこで、980MPa級の厚さ $t=1.4\text{mm}$ の鋼板で、実施例1と同じようにせん断型引張試験片を作成した。スポット溶接のナゲット径は、 $6\sqrt{t}$ である。インストロンタイプ試験機を用いて試験を実施し、その際のスポット溶接部破断までの荷重と変位を計測した。同時に、試験と同一形状のせん断型引張試験と十字型引張試験をコンピュータ上でモデル化し、上記のサブルーチンプログラムを実装したFEMコードで引張試験の解析を行いスポット溶接部の破断を自動判定させて、実験と同様のスポット溶接の破断までの荷重と変位を計算した。入力した初期パラメータは、 $TS=983\text{ (MPa)}$ 、 $t=1.4\text{ (mm)}$ 、 $d=7.2\text{ (mm)}$ 、 $\theta=23^\circ$ 、 $\alpha_1=2.12(-)$ 、 $W=40\text{ (mm)}$ を用いた。 α_1 は、図9に示すように、実験から求めた α_1 と d/W の曲線のグラフから読み取ることにより決定した。これより得られた破断強度パラメータ $F_{tss}=26340\text{ (N)}$ を有限要素法によりスポット溶接周りの変形をモデル化した破断予測式に導入して、スポット溶接部破断を判定した。

[0047] 試験モデルは、実際の部材の衝突解析で適用できることを考慮して、実車の衝突解析レベルの粗いシェル要素で作成し、境界条件も単純化している。

[0048] 図11は、このシステムの検証例であり、せん断型引張試験で実験とFEM解析の荷

重一ストローク曲線上で破断荷重が一致していることが分る。せん断型引張試験では、破断荷重に至るまでの荷重一変位曲線の形状が実験と解析で異なるように見えるが、実施例1で述べたものと同じ原因であり、問題はない。

[0049] さらに、単純な部材の軸圧潰試験で、予測モデルの検証を行った。部材6は、図12Aに示すように、断面がハット型と当て板のスポット溶接で構成され、ハット頂部、たて壁がそれぞれ50mmで、フランジが20mm、圧潰方向の長さが300mmである。部材に使用した材料は、上記と同じ980MPa級の鋼材であり、スポット溶接のナゲット径は、 $4\sqrt{t} \text{ mm}$ である。落錘の重さを500kg、圧潰時の初期速度を6m/sとして、動的な圧潰試験を実施し、それと同じ条件で、FEM解析を行った。シミュレーション7を示す図12B、実際の実験を示す図12Cに示すように、圧潰後の部材形状で、試験結果とFEM解析結果を比較すると、座屈の形状が同じで、特に、どちらもスポット溶接部が破断することにより、当て板が外れている形態が一致する。これにより、実車の全体モデルや部分モデルの大規模な衝突解析で、詳細部を単純化した実用レベルの解析でも、正確にスポット破断を予測できることを示している。

産業上の利用可能性

[0050] 本発明によれば、コンピュータ上の有限要素法解析により、例えば自動車部材のスポット溶接をモデル化した部分での破断予測を正確に行うことができるので、実際の自動車の部材での衝突試験時のスポット溶接部破断の検証を省略することができるか、又は、検証試験の回数を大幅に削減することができる。また、例えば自動車の部材のスポット溶接条件を変えた試作・衝突試験の大規模な実験によるスポット溶接破断を防ぐ部材設計を、コンピュータ上の衝突解析によるスポット溶接部破断を防ぐ設計に置き換えることができるので、大幅なコスト削減・設計開発期間の短縮に寄与することができる。

請求の範囲

- [1] スポット溶接継ぎ手において、十字型引張試験及び／又はせん断型引張試験を基に、材料強度、板厚、スポット溶接のナゲット径、継ぎ手の板幅、及び引張試験の継ぎ手の回転角のすべて或いはいずれかを入力する入力手段と、
前記材料強度、板厚、スポット溶接のナゲット径、継ぎ手の板幅、及び引張試験の継ぎ手の回転角のすべて或いはいずれかから、十字型引張及び／又はせん断型引張でのスポット溶接部の破断強度パラメータを算出する演算手段と、
前記鋼種毎の破断強度パラメータを記憶するパラメータ記憶手段と、
前記パラメータ記憶手段に記憶した破断強度パラメータを、有限要素法によりスポット溶接周りの変形をモデル化した破断予測式に導入して、スポット溶接部破断を判定する演算手段とを有することを特徴とするスポット溶接部の破断予測装置。
- [2] スポット溶接継ぎ手において、十字型引張試験及び／又はせん断型引張試験を基に、材料強度、板厚、スポット溶接のナゲット径、継ぎ手の板幅、及び引張試験の継ぎ手の回転角を入力する入力手段と、
前記材料強度、板厚、スポット溶接のナゲット径、継ぎ手の板幅、及び引張試験の継ぎ手の回転角のすべて或いはいずれかから、スポット溶接部の破断強度曲線を求め、前記破断強度曲線に基づき十字型引張及び／又はせん断型引張での破断強度パラメータを算出する演算手段と、
前記鋼種毎の破断強度パラメータを記憶するパラメータ記憶手段と、
前記パラメータ記憶手段に記憶した破断強度パラメータを、有限要素法によりスポット溶接周りの変形をモデル化した破断限界線に導入して、スポット溶接部破断を判定する演算手段とを有することを特徴とするスポット溶接部の破断予測装置。
- [3] スポット溶接継ぎ手において、十字型引張試験及び／又はせん断型引張試験を基に、材料強度、板厚、スポット溶接のナゲット径、継ぎ手の板幅、及び引張試験の継ぎ手の回転角のすべて或いはいずれかを入力する工程と、
前記材料強度、板厚、スポット溶接のナゲット径、継ぎ手の板幅、及び引張試験の継ぎ手の回転角のすべて或いはいずれかから、十字型引張及び／又はせん断型引張でのスポット溶接部の破断強度パラメータを算出する工程と、

前記鋼種毎の破断強度パラメータをパラメータ記憶手段に記憶する工程と、
前記パラメータ記憶手段に記憶した破断強度パラメータを、有限要素法によりスポット溶接周りの変形をモデル化した破断予測式に導入して、スポット溶接部破断を判定する工程とを有することを特徴とするスポット溶接部の破断予測方法。

- [4] スポット溶接継ぎ手において、十字型引張試験及び／又はせん断型引張試験を基に、材料強度、板厚、スポット溶接のナゲット径、継ぎ手の板幅、及び引張試験の継ぎ手の回転角のすべて或いはいずれかを入力する工程と、
前記材料強度、板厚、スポット溶接のナゲット径、継ぎ手の板幅、及び引張試験の継ぎ手の回転角のすべて或いはいずれかから、スポット溶接部の破断強度曲線を求め、前記破断強度曲線に基づき十字型引張及び／又はせん断型引張での破断強度パラメータを算出する工程と、
前記鋼種毎の破断強度パラメータをパラメータ記憶手段に記憶する工程と、
前記パラメータ記憶手段に記憶した破断強度パラメータを、有限要素法によりスポット溶接周りの変形をモデル化した破断限界線に導入して、スポット溶接部破断を判定する工程とを有することを特徴とするスポット溶接部の破断予測方法。
- [5] スポット溶接継ぎ手において、十字型引張試験及び／又はせん断型引張試験を基にして入力される材料強度、板厚、スポット溶接のナゲット径、継ぎ手の板幅、及び引張試験の継ぎ手の回転角のすべて或いはいずれかから、十字型引張及び／又はせん断型引張でのスポット溶接部の破断強度パラメータを算出する工程と、
前記鋼種毎の破断強度パラメータをパラメータ記憶手段に記憶する工程と、
前記パラメータ記憶手段に記憶した破断強度パラメータを、有限要素法によりスポット溶接周りの変形をモデル化した破断予測式を導入して、スポット溶接部破断を判定する工程とをコンピュータに実行させることを特徴とするスポット溶接部の破断予測のためのコンピュータプログラム。
- [6] スポット溶接継ぎ手において、十字型引張試験及び／又はせん断型引張試験を基にして入力される材料強度、板厚、スポット溶接のナゲット径、継ぎ手の板幅、及び引張試験の継ぎ手の回転角のすべて或いはいずれかから、スポット溶接部の破断強度曲線を求め、前記破断強度曲線に基づき十字型引張及び／又はせん断型引張で

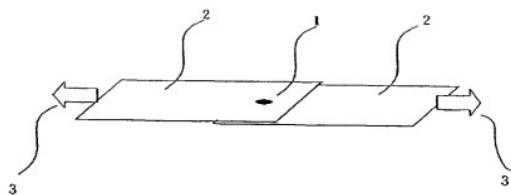
のスポット溶接部の破断強度パラメータを算出する工程と、

前記鋼種毎の破断強度パラメータをパラメータ記憶手段に記憶する工程と、

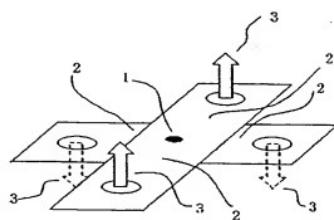
前記パラメータ記憶手段に記憶した破断強度パラメータを、有限要素法によりスポット溶接周りの変形をモデル化した破断限界線に導入して、スポット溶接部破断を判定する工程とをコンピュータに実行させることを特徴とするスポット溶接部の破断予測のためのコンピュータプログラム。

- [7] スpot溶接継ぎ手において、十字型引張試験及び／又はせん断型引張試験を基にして入力される材料強度、板厚、spot溶接のナゲット径、継ぎ手の板幅、及び引張試験の継ぎ手の回転角のすべて或いはいずれかから、十字型引張及び／又はせん断型引張でのspot溶接部の破断強度パラメータを算出する工程と、
前記鋼種毎の破断強度パラメータをパラメータ記憶手段に記憶する工程と、
前記パラメータ記憶手段に記憶した破断強度パラメータを、有限要素法によりspot溶接周りの変形をモデル化した破断予測式を導入して、spot溶接部破断を判定する工程とをコンピュータに実行させるコンピュータプログラムを記録したことを特徴とするコンピュータ読み取り可能な記録媒体。
- [8] スpot溶接継ぎ手において、十字型引張試験及び／又はせん断型引張試験を基にして入力される材料強度、板厚、spot溶接のナゲット径、継ぎ手の板幅、及び引張試験の継ぎ手の回転角のすべて或いはいずれかから、spot溶接部の破断強度曲線を求め、前記破断強度曲線に基づき十字型引張及び／又はせん断型引張でのspot溶接部の破断強度パラメータを算出する工程と、
前記鋼種毎の破断強度パラメータをパラメータ記憶手段に記憶する工程と、
前記パラメータ記憶手段に記憶した破断強度パラメータを、有限要素法によりspot溶接周りの変形をモデル化した破断限界線に導入して、spot溶接部破断を判定する工程とをコンピュータに実行させるコンピュータプログラムを記録したことを特徴とするコンピュータ読み取り可能な記録媒体。

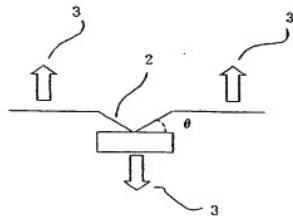
[図1]



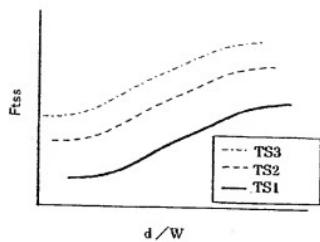
[図2]



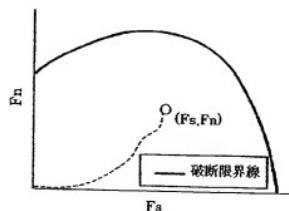
[図3]



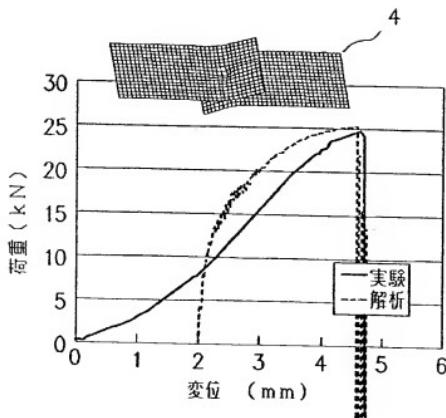
[図4]



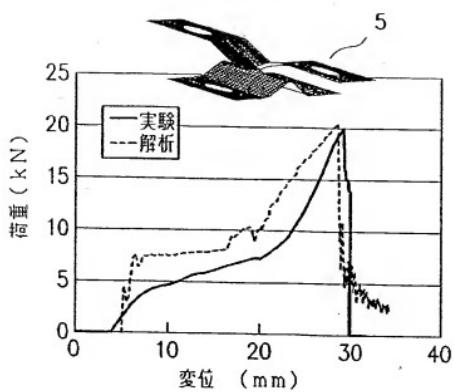
[図5]



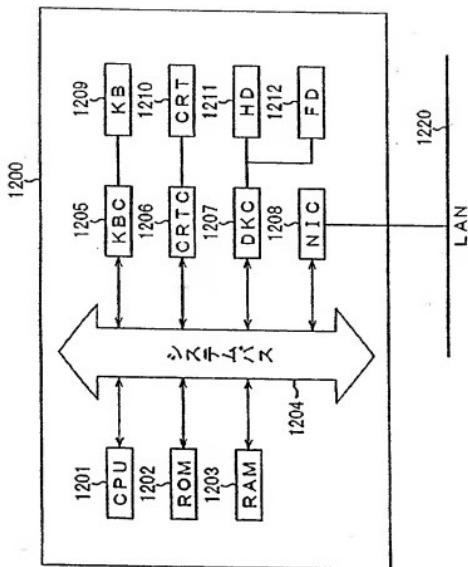
[図6]



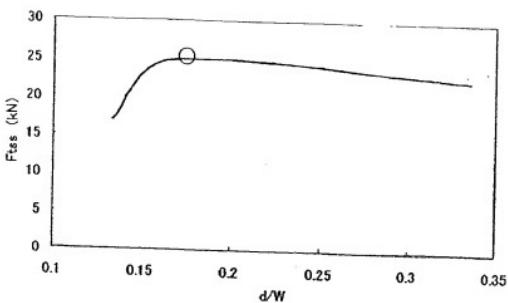
[図7]



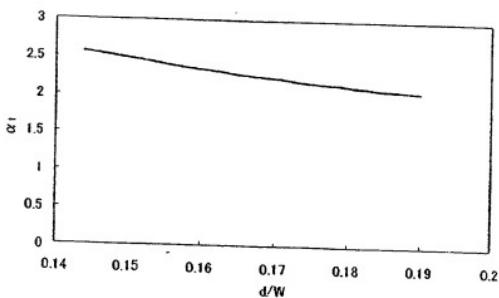
[図8]



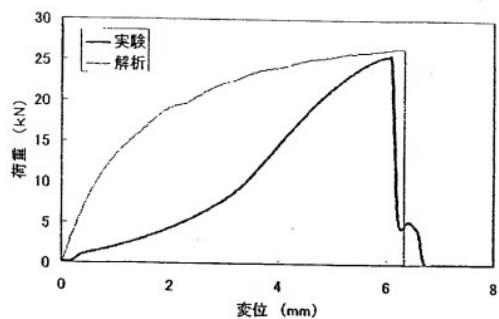
[図9]



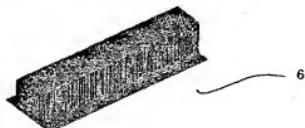
[図10]



[図11]



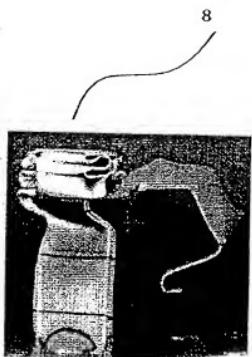
[図12A]



[図12B]



[図12C]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2005/007100

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int. Cl⁷ G01N3/00, B23K11/24, G01M7/08, G01N3/08, 3/24, G06F17/50

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int. Cl⁷ G01N3/00-3/62, B23K11/10-11/26, G01M7/08-7/08, G06F17/50

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho 1922-1996 Jitsuyo Shinan Toroku Kaho 1996-2005
Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2005 Toroku Jitsuyo Shinan Kaho 1994-2005Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)
JST7580 (JOIS), JSTplus (JOIS)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages | Relevant to claim No. |
|-----------|--|-----------------------|
| A | JP 2002-316267 A (Nippon Steel Corp.), 29 October, 2002 (29.10.02), Full text; all drawings (Family: none) | 1-8 |
| A | Oeamu TAKATORI, Jun'ya MORIMOTO, Hirotoshi HATA, "Tetsudo Sharyo no Shototsu Simulation", JARI Research Journal, Vol.24, No.7, 01 July, 2002 (01.07.02), pages 265 to 268 | 1-8 |
| A | Eizaburo NAKANISHI, Teruaki INOUE, Shigeo WATANABE, "Shatai Shototsuji no Spot Yosetsu Hadan Yosoku ni Kansuru Kokoromi", Society of Automotive Engineers of Japan, Gakujutsu Koen Maesatsuma, No.88-00, 17 October, 2000 (17.10.00), pages 1 to 4 | 1-8 |

 Further documents are listed in the continuation of Box C. See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

'A' document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

'E' earlier application or patent but published on or after the international filing date

'L' document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

'O' document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
'P' document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

'T' later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

'X' document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

'Y' document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

'Z' document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
04 July, 2005 (04.07.05)Date of mailing of the international search report
19 July, 2005 (19.07.05)Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2005/007100

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages | Relevant to claim No. |
|-----------|---|-----------------------|
| A | Teruaki INOUE, Eizaburo NAKANISHI, "Yosetsubu Hadan o Koryo shita Shatai Shototsu Simulation", Society of Automotive Engineers of Japan, Gakujutsu Koenkai Maesatsushu, No.88-00, 17 October, 2000 (17.10.00), pages 5 to 7 | 1-8 |

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC））

Int.Cl.⁷ G01N3/00, B23K11/24, G01M7/08, G01N3/08, 3/24, C06F17/50

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（IPC））

Int.Cl.⁷ G01N3/00-3/62, B23K11/10-11/26, G01M7/08-7/08, C06F17/50

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

| | |
|-------------|------------|
| 日本国実用新案公報 | 1992-1996年 |
| 日本国公開実用新案公報 | 1997-2005年 |
| 日本国実用新案登録公報 | 1996-2005年 |
| 日本国登録実用新案公報 | 1994-2005年 |

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

JST7580(JOIS), JSTPlus(JOIS)

C. 関連すると認められる文献

| 引用文献の カテゴリー* | 引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示 | 関連する 請求の範囲の番号 |
|-----------------|--|------------------|
| A | JP 2002-316267 A (新日本製鐵株式会社) 2002.10.29, 全文、全図 (ファミリーなし) | 1-8 |
| A | 鷹取収、森本准哉、畠弘敏, 鉄道車両の衝突シミュレーション, 自動車研究, 第24巻、第7号, 2002.07.01, p.265-268 | 1-8 |
| A | 中西栄三郎、井上輝明、渡辺茂雄, 車体衝突時のスポット溶接破断予測に関する試み, 自動車技術会 学術講演会前刷集, No. 88-00, 2000.10.17, p.1-4 | 1-8 |

C欄の続きを以て文献が列挙されている。

パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

- 「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
 「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
 「L」優先権主による疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）
 「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
 「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願
- の日の後に公表された文献
 「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
 「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
 「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
 「&」同一パテントファミリー文献

| | |
|---|--|
| 国際調査を完了した日 04.07.2005 | 国際調査報告の発送日 19.7.2005 |
| 国際調査機関の名称及びあて先 日本国特許庁 (ISA/JP) 郵便番号 100-8915 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号 | 特許庁審査官（権限のある職員） 高見 重雄 電話番号 03-3581-1101 内線 3252 2J 9116 |

| C(続き) 関連すると認められる文献 | | 関連する 請求の範囲の番号 |
|--------------------|---|------------------|
| 引用文献の カテゴリー* | 引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示 | |
| A | 井上輝明、中西栄三郎, 溶接部破断を考慮した車体衝突シミュレーション, 自動車技術会 学術講演会前刷集, No.88-00, 2000.10.17, p.5-7 | 1-8 |